

Однако следует учитывать, что увеличение экономичности котла-утилизатора ограничено минимально допустимым значением температуры уходящих газов  $T_{yx}^{min}$  по условиям предотвращения коррозии низкотемпературных поверхностей нагрева КУ.

### Список использованных источников

1. Цанев С.В. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций / С.В. Цанев, В.Д. Буров, А.Н. Ремезов. – М.: Изд. дом МЭИ, 2006. – 584 с.
2. Яковлев Б.В., Гринчук А.С. Оптимизация начальных параметров и степени дожигания топлива в котлах-утилизаторах ПГУ с одним или двумя давлениями пара // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2007. №6. С. 69-77.
3. Цанев С.В. Дожигание топлива в тепловой схеме конденсационных парогазовых установок с котлами-утилизаторами одного давления / С.В. Цанев, В.Д. Буров, В.Е. Торжков. – М.: Изд. дом МЭИ, 2004. – 48 с.
4. Тарасевич Л.А., Тузанкин А.И. Влияние параметров тепловой схемы ПГУ-КЭС с дополнительным сжиганием топлива на характер изменения тепловой экономичности установки // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2013. №6. С. 64-71.

УДК 669.015.7 (083)

**Я. П. Герасименко, Е. И. Мешков, Т. Е. Герасименко**  
ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт  
(государственный технологический университет)», г. Владикавказ

## К РАСЧЕТУ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТАРЕЛЬЧАТЫХ АБСОРБЕРОВ

### Аннотация

*В работе приведены наиболее часто встречающиеся в инженерной практике задачи проектирования, одной из которых является определение гидравлического сопротивления для создания правильного тягового режима при эксплуатации тарельчатого абсорбера. Приведены параметры, оказывающие влияние на величину гидравлического сопротивления и рассмотрены особенности расчета гидравлического сопротивления тарельчатых абсорберов.*

**Ключевые слова:** тарельчатый абсорбер, гидравлическое сопротивление, загрязнение атмосферы, задача проектирования и эксплуатации.

### Abstract

*The paper presents the most frequently encountered design problems in engineering practice, one of which is the determination of hydraulic resistance to create the correct traction mode during the operation of a disk absorber. The parameters affecting the magnitude of the hydraulic resistance*

*are presented and the features of the calculation of the hydraulic resistance of disc absorbers are considered.*

**Key words:** *plate absorber, hydraulic resistance, atmospheric pollution, the task of design and operation.*

Данные Федеральной службы государственной статистики Росстата подтверждают, что металлургия является отраслью, которая вносит существенный вклад в загрязнение атмосферного воздуха. В 2017 году металлургические предприятия от стационарных источников выбросили в атмосферу 3752,5 тыс. тонн пыли и вредных газообразных примесей, что составило 21,5 % от общего количества загрязняющих веществ, поступающих от стационарных источников [1]. Технологические и аспирационные газы уносят из металлургических агрегатов и цехов пыль, содержащую цветные металлы и вредные газообразные примеси. Установка систем очистки технологических газов на металлургических печах позволяет существенно снижать воздействие этой отрасли промышленности на окружающую среду. Причем на эффективность очистки газов в системах пылеулавливания существенное влияние оказывают грамотные проектные решения и правильная эксплуатация газоочистного оборудования.

Тарельчатые абсорберы часто применяют в металлургии для утилизации оксидов серы, азота и других плохо растворимых загрязняющих веществ. Тарельчатые абсорберы относят к высокоинтенсивным газоочистным аппаратам. Их применяют для обработки значительных количеств газа в тех случаях, когда обе или одна из фаз загрязнены твердыми нерастворимыми веществами. Тарельчатые абсорберы работают при непрерывной подаче газа и абсорбента. Абсорберы такого типа – это вертикальные цилиндрические аппараты, внутри которых размещаются горизонтальные тарелки на определенном расстоянии друг от друга по высоте аппарата. Тарелки служат для развития поверхности контакта фаз при направленном движении этих фаз (жидкость течет сверху вниз, а газ проходит снизу вверх) и многократном взаимодействии жидкости и газа. В результате происходит ступенчатая, непрерывная очистка запыленного газа. На эффективность тарелок основное влияние оказывают гидродинамические условия их работы. В зависимости от скорости газа различают три основных гидродинамических режима работы тарельчатых абсорберов: пузырьковый, пенный и струйный. Эти режимы различаются структурой газожидкостного слоя на тарелке, которая в основном определяет его гидравлическое сопротивление, высоту и поверхность контакта на тарелке.

Основными недостатками тарельчатых абсорберов являются невысокая производительность, необходимость предварительного удаления из потока твердых пылевых частиц и сложность технологического расчета при проектировании.

Технологический расчет абсорбера конкретизируется в зависимости от постановки задачи. В наиболее часто встречающихся в инженерной практике задачах проектирования он обычно включает:

- расчет геометрических размеров абсорбера, при которых обеспечивается необходимая степень разделения газовой смеси и заданная производительность;
- расчет необходимого расхода абсорбента;
- определение гидравлического сопротивления для создания правильного тягового режима при эксплуатации аппарата.

Неправильная эксплуатация систем очистки газов может привести к резкому повышению выброса загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Одним из примеров нарушения работы систем очистки газов, является сбой в работе аппаратов при неправильном выборе дутьевого устройства, связанного с погрешностью в расчете гидравлического сопротивления аппарата.

Рассмотрим особенности расчета гидравлического сопротивления тарельчатых абсорберов. Жидкость в абсорбер подается, как правило, сверху и стекает самотеком по элементам насадки или по сливным трубам, организующим перелив жидкости с тарелки на тарелку. Поэтому вопрос о потере напора для жидкости при прохождении ее через абсорбер не рассматривается. Достаточно лишь подать необходимое количество абсорбента ( $L$ ) в аппарат сверху и соответствующим образом распределить в абсорбере.

Для обеспечения требуемого газового потока ( $G$ ) через абсорбер нужен напор, достаточный для компенсации всех гидравлических потерь, связанных с прохождением газа по аппарату, обеспечиваемый дутьевым устройством. Повышение давления газа (его сжатие) сопровождается затратами энергии, иногда весьма существенными. Необходимая мощность дутьевого устройства зависит от скорости газового потока, поэтому выбор оптимальной скорости газа в аппарате производится с помощью технико-экономического расчета, учитывающего этот расход энергии. Полное гидравлическое сопротивление одной тарелки ( $\Delta p_i$ ) любой конструкции складывается из статического сопротивления жидкости на тарелке ( $\Delta p_{ж}$ ), потерь напора на преодоление местных сопротивлений на сухой (неорошаемой) тарелке ( $\Delta p_c$ ) и сопротивления, вызываемого силами поверхностного натяжения ( $\Delta p_\sigma$ ):

$$\Delta p_i = \Delta p_{ж} + \Delta p_c + \Delta p_\sigma. \quad (1)$$

Величину статического сопротивления жидкости на тарелке ( $\Delta p_{ж}$ ), зависящую от полной высоты слоя жидкости ( $h_{ж}$ ), плотности жидкости ( $\rho_{ж}$ ) на тарелке (см. рисунок) определяют по формуле гидростатического давления:

$$\Delta p_{ж} = \rho_{ж}^{всп} g h_{ж}, \quad (2)$$

где  $\rho_{ж}^{всп}$  – плотность вспененной жидкости (газожидкостной смеси) на тарелке, причем  $\rho_{ж}^{всп} = (0,5 \div 0,7) \rho_{ж}$ .

На тарелках непровального типа полная высота слоя жидкости ( $h_{ж}$ ) в формуле (2) формируется (см. рисунок) высотой сливной перегородки ( $h_{сл}$ ) и величиной подпора жидкости над перегородкой ( $h_{сл}^{подп}$ ):  $h_{ж} = h_{сл} + h_{сл}^{подп}$ . Значение ( $h_{сл}^{подп}$ ) зависит от массового расхода абсорбента ( $L$ ), и по опытным данным, принимается обычно равным  $h_{сл}^{подп} = (0,65-0,7) L_v^{2/3}$ , где  $L_v$  – плотность орошения. Плотность орошения – это объемный расход жидкости, отнесенный к единице

длины  $B$  сливной перегородки, которая связана с массовым расходом абсорбента  $L$  соотношением:

$$L_B = \frac{L(1+x)}{\rho_{\text{ж}} B}, \quad (3)$$

где  $x$  – концентрация поглощаемого компонента в абсорбенте, кг/кг.

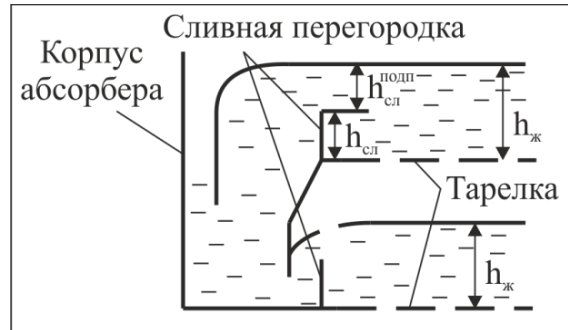


Рис. К определению высоты слоя жидкости на тарелках с переливными устройствами

Потерю напора газа при прохождении его через местные сопротивления, например, отверстия ситчатых тарелок и т.п., определяют по формуле:

$$\Delta p_c = \frac{\xi \omega_{\text{отв}}^2 \rho_{\text{г}}}{2}, \quad (4)$$

где  $\xi$  – коэффициент местного сопротивления;  $\omega_{\text{отв}}$  – скорость газового потока в отверстиях тарелки, м/с;  $\rho_{\text{г}}$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>.

При известной скорости газа ( $\omega_{\text{г}}$ ) в абсорбере величина  $\omega_{\text{отв}}$  находится из уравнения расхода с учетом доли свободного сечения отверстий тарелки  $\phi_{\text{св}}$ :

$$\omega_{\text{отв}} = \frac{\omega}{\phi_{\text{св}}}, \quad (5)$$

Коэффициенты местных сопротивлений для тарелок различных конструкций приведены в источниках литературы [2-4]. Влияние уровня жидкости на тарелке на коэффициент местного сопротивления при этом, как правило, не учитывается. Обозначим  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения на границе «газ-жидкость»,  $d_e$  – эквивалентный диаметр каналов для прохода газа через отверстия тарелки. Причем  $d_e = d_0$  в случае круглых отверстий диаметром  $d_0$ . Приравняем формальное и физически обоснованное выражения для сил поверхностного натяжения в отверстиях:

$$\Delta p_{\sigma} \frac{\pi d_e^2}{4} = \pi d_e \sigma, \quad (6)$$

Отсюда сопротивление, обусловленное силами поверхностного натяжения, равно

$$\Delta p_{\sigma} = \frac{4\sigma}{d_e}. \quad (7)$$

Полное сопротивление тарельчатого абсорбера, содержащего  $n$  тарелок, складывается из сопротивления всех тарелок  $\Delta p = \sum_{i=1}^n \Delta p_i$ .

Если в процессе очистки газа, то есть по высоте абсорбера, физические свойства абсорбента ( $\rho_{\text{ж}}$  и  $\sigma$ ) меняются незначительно, а гидродинамические характеристики тарелок ( $h_{\text{ж}}$ ,  $h_{\text{сл}}$  и  $h_{\text{сл}}^{\text{подп}}$ ) остаются неизменными, то потери напора на отдельных тарелках близки между собой ( $\Delta p_i = \Delta p_1$ ), и полное сопротивление абсорбера  $\Delta p$  можно найти как произведение  $\Delta p_1 n$ .

На тарелках провального типа слой жидкости создается и поддерживается при скоростях газа, превышающих некоторое минимальное значение, ниже которого вся жидкость протекает через отверстия тарелки. Наоборот, при очень больших скоростях газа все сечение отверстий тарелки занято газовым потоком, и жидкость не может перетекать с тарелки на тарелку – это режим захлебывания абсорбера. Рабочая скорость газового потока должна быть ниже скорости захлебывания. Ее принимают такой, чтобы на тарелке образовывался слой жидкости высотой 0,05-0,1 м, соответствующий величине  $\Delta p_{\text{ж}} = 250-350$  Па [4]. При этом через одни и те же отверстия тарелок поочередно или одновременно проходят и газ, и жидкость. Доля отверстий, занятая стекающей жидкостью, зависит от соотношения расходов газовой и жидкой фаз и составляет обычно 10-20 % от площади всех отверстий.

Итак, гидравлическое сопротивление абсорберов зависит от гидродинамических режимов, которые в основном определяются скоростью газа в абсорбере, и от конструктивных особенностей аппарата. Оптимальную скорость в абсорбере можно определить только технико-экономическим расчетом с учетом влияния скорости газа, как на гидравлическое сопротивление, так и на диаметр и высоту аппарата. Поэтому при решении задач проектирования в основе всех технологических расчетов лежит скорость движения газа в абсорбере, регулируемая тягодутьевым устройством, мощность которого зависит от гидравлического сопротивления всех конструктивных элементов аппарата.

### Список использованных источников

1. Федеральная служба государственной статистики. Официальная статистика. Охрана окружающей среды. Охрана атмосферного воздуха. [Электронный ресурс]. – Дата обращения (11.03.2019) – [http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat\\_main/rosstat/ru/statistics/environment/](http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/environment/).
2. Александров И.А. Ректификационные и абсорбционные аппараты. Методы расчета и основы конструирования. М.: Химия, 1978. – 280 с.
3. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1975. – 560 с.
4. Гельперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1981. – 812 с.
5. Айнштейн В.Г., Захаров М.К., Носов Г.А. [и др.]. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии. Кн. 1, 2; под науч. ред. В.Г. Айнштейна. – М.: Химия, 2000. – 1760 с.